

УДК [681.5:658.5]:681.3

Р. Г. ВАЛЕЕВА

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕРАВНОВЕСНЫМИ СОСТОЯНИЯМИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ РЫНКА

Предлагается подход к решению важной научно-практической проблемы, состоящей в разработке методологических и теоретических основ анализа, синтеза и интеллектуального управления неравновесными состояниями производственных систем и комплексов в условиях рынка на основе имитационного моделирования. *Производственная система; неравновесные состояния, петлевые маркированные графы, интеллектуальная система поддержки принятия решений*

### ВВЕДЕНИЕ

Анализ производственных систем представляет собой сложную и многоаспектную проблему. В зависимости от постановки конкретной задачи исследования производственные системы могут рассматриваться на разных уровнях абстрагирования и с точки зрения различных аспектов их функционирования.

Производственные системы как класс больших и сложных, динамических, плохо формализуемых систем исследуются с позиций управления с целью повышения эффективности их функционирования. Процессы управления производственными системами в условиях рыночных отношений усложняются, поскольку к особенностям самих систем добавляются факторы неопределенности внешней среды и взаимодействия с другими системами.

Для современных ПС характерен высокий уровень динамичности, и неравновесные режимы функционирования для них являются доминирующими. Повышение эффективности управления системой может быть обеспечено в первую очередь за счет использования моделей и информационных технологий принятия решений на базе перспективных алгоритмов интеллектуального управления.

Кроме того, современная тенденция к интеграционным процессам в экономике, результатом которых является объединение производственных систем в производственные комплексы, выдвинула проблему обеспечения устойчивого взаимодействия систем на различных режимах их совместного функционирования. Актуальной становится пробле-

ма исследования динамики функционирования производственных комплексов и разработки эффективных алгоритмов управления ПК с учетом изменчивости внешней среды и ограничений систем по ресурсам. Повышение эффективности управления комплексом может быть достигнуто за счет разработки и применения алгоритмов принятия решений по синтезу моделей и структур отдельных систем, а также решений по синтезу связей между подсистемами на основе анализа устойчивости функционирования комплекса.

Целью исследования является решение важной научно-практической проблемы, состоящей в разработке методологических и теоретических основ анализа, синтеза и интеллектуального управления неравновесными состояниями производственных систем и комплексов в условиях рынка на основе имитационного моделирования и в применении полученных результатов для решения практических задач повышения эффективности функционирования данного класса систем за счет интеллектуализации процессов принятия решений при планировании, производстве и сбыте продукции.

Анализ сформулированной проблемы показал, что учет динамики является наиболее сложной и наименее разработанной к настоящему времени задачей управления данным классом систем [1]. Большинство исследований посвящено либо моделированию макроэкономических процессов, либо изучению динамики производства без учета динамики сбыта, либо описанию только рыночных процессов взаимодействия спроса и предложения и ценообразования. Известные динамические

модели производственных систем описывают лишь некоторые аспекты производственно-сбытовой деятельности и не обеспечивают эффективного управления производством в изменяющихся условиях рыночной среды.

Область исследования и моделирования динамики функционирования управляемых производственных комплексов является малоизученной. Известные модели экономической динамики не позволяют исследовать устойчивость ПК на динамически равновесных и неравновесных режимах и синтезировать структуры и алгоритмы системы управления, обеспечивающие устойчивое эффективное функционирование комплекса и его подсистем.

Определен круг научных и практических задач, решение которых обеспечит эффективность функционирования производственных систем и комплексов за счет разработки и применения динамических (непрерывно-логических) и интеллектуальных алгоритмов поддержки решений по управлению. Это, прежде всего, разработка методологии исследования и интеллектуального управления сложными, динамическими, плохо формализуемыми производственными системами и комплексами.

#### 1. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПС И ПК

Предлагаемая методология исследования и моделирования динамики управляемых производственных комплексов основана на использовании общесистемных принципов и подходов применительно к сложным многокомпонентным ПК. Особенностью методологии является построение моделей подсистем комплекса и моделей связей между подсистемами в классе динамических непрерывных детерминированных моделей. Достоинства данного класса моделей состоят в том, что, применяя хорошо разработанный математический аппарат комплексного анализа, они позволяют описывать, во-первых, структуру системы и ее свойства, во-вторых, динамику системы, в-третьих, влияние внешних возмущений на систему, т. е. исследовать поведение комплекса на достаточно большом множестве реальных ситуаций.

Предлагаемая методология отличается от традиционных тем, что обладает следующими возможностями:

- определяет с общих методологических позиций правила построения реальных и вир-

туальных производственных объединений, способных устойчиво функционировать;

- позволяет отразить при моделировании основные свойства ПК: сложность и изменчивость структуры, динамичность, многофункциональность;

- учитывает влияние самых различных (благоприятных и неблагоприятных) факторов на динамику функционирования комплекса;

- раскрывает механизм образования общесистемных свойств, характеристик, эффектов при взаимодействии нескольких объектов в составе единого комплекса;

- имитирует поведение производственного комплекса и его элементов в условиях изменчивости внешней среды и ограниченности ресурсов подсистем и осуществляет поиск эффективных алгоритмов его функционирования.

Предлагаемый подход к разработке системы управления ПС в условиях рынка основан на следующих предпосылках:

- во-первых, производство и сбыт рассматриваются как единый управляемый процесс, что позволяет учесть взаимовлияние рынка и производства;

- во-вторых, поскольку описание производственной системы как динамического объекта выполняется в темпах или интенсивностях изменения производственно-экономических показателей, то цель системы управления формулируется как поддержание динамического равновесия при движении системы;

- в-третьих, система управления ПС строится в классе иерархических систем и основывается на интеллектуальных алгоритмах поддержки принимаемых решений.

Особенность предлагаемой методологии моделирования процесса управления производством на уровне предприятия состоит в объединении двух различных моделей — динамической и интеллектуальной, реализуемых методом имитационного моделирования на ЭВМ и обеспечивающих эффективное управление системой [2]. Динамическая модель используется для анализа процессов производства и реализации продукции, для прогнозирования возможных состояний, а также для проверки правильности принимаемых решений.

В автоматизированной системе имитационного моделирования и поддержки принятия решений выполняется анализ динамики основных показателей, принимается од-

но из решений, рекомендуемых интеллектуальной моделью, оценивается его эффективность. В каждом решении осуществляется воздействие на одну или несколько управляющих переменных с учетом допустимых областей изменения значений переменных, рекомендуемых автоматизированной системой.

Передача данных из динамической модели в интеллектуальную осуществляется при моделировании дискретно, в различные моменты модельного времени. В алгоритмах принятия решений эти данные используются только в случае неблагоприятных, по мнению управляющего, ситуаций. Принятие решений по управлению в реальной ПС обосновывается в системе имитационного моделирования предварительным анализом ситуаций, выбором наиболее перспективного решения и проверкой возможных последствий этого решения.

Системное объединение процедур анализа текущего состояния производственной системы на основе динамических моделей, принятия решений на основе интеллектуальных алгоритмов поддержки решений и выборочного вмешательства человека в процесс управления составляет основу предлагаемого подхода к управлению данным классом объектов.

Предложенная модель управления производственной системой отличается от известных автоматизированных систем управления производством тем, что:

- во-первых, позволяет моделировать динамику функционирования системы и управлять переходом из одного динамически равновесного состояния в другое, а также проверять достоверность и эффективность принимаемых решений;

- во-вторых, позволяет описать плохо формализуемые закономерности функционирования системы в неопределенных условиях рынка, сочетая числовые, лингвистические (нечеткие) значения переменных, а также интеллектуальные способности и профессиональный опыт управляющего;

- в-третьих, пригодна для практического использования при создании интеллектуальной системы поддержки принятия решений.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЯЕМЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

На основе предложенной методологии исследования управляемых производственных комплексов разработана общая функциональ-

ная схема модели  $n$ -компонентного комплекса, положенная в основу построения математических моделей комплекса и моделей его элементов.

При разработке математических моделей производственного комплекса приняты следующие допущения:

- подсистемами являются производственные предприятия, реально или виртуально взаимосвязанные между собой единством производственно-потребительской цепочки продукции;

- допускается, что каждая производственная подсистема выпускает продукцию одного функционального назначения и, следовательно, может рассматриваться как однопродуктовая и, кроме того, не использует собственной готовой продукции для своего производства;

- предполагается, что интенсивность процесса обмена между предприятиями комплекса значительна и регулярна, что позволяет рассматривать его как непрерывный процесс;

- производственный комплекс моделируется как гомогенная система в том смысле, что каждая подсистема по своим динамическим свойствам идентична другим, т. е. при одинаковых условиях каждая подсистема выпускает продукцию (независимо от ее вида) с одинаковыми темпами, выраженными в относительных единицах. При этом элементный состав подсистем будет различным;

- допускается, что период функционирования подсистем в составе комплекса достаточно продолжителен, чтобы рассматривать производственный процесс как стационарный.

Производственный комплекс состоит из  $n$  подсистем (компонентов), каждая  $i$ -я подсистема выпускает продукцию объемом  $N_i$  с темпом  $\dot{N}_i$  и связана со всеми другими подсистемами. Процесс выпуска продукции рассматривается как процесс непрерывного расходования обобщенного ресурса  $\dot{R}_i^0$ . Под обобщенным ресурсом понимается совокупность всех необходимых для выпуска продукции видов ресурсов, выраженных в стоимостном эквиваленте.

Особенность функционирования комплекса состоит в том, что для обеспечения планового темпа расхода обобщенного ресурса  $\dot{R}_i^0$  каждой  $i$ -й подсистеме необходимо расходовать собственные ресурсы с темпом  $\dot{R}_{i0}$ , а также ресурсы, поступающие от других, связанных с ней, подсистем с темпом  $\dot{R}_{ij}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,

$i \neq j, j = \overline{1, n-1}$ . Темп расхода ресурсов  $\dot{R}_{ij}$  представляет собой часть выпускаемой в единицу времени продукции  $j$ -й подсистемы, необходимой для поддержания темпа выпуска продукции  $i$ -й подсистемой. Эта часть формирует модель производственно-экономических отношений (связей) между подсистемами в динамике.

Линейная математическая модель производственной подсистемы представляется в виде совокупности динамических звеньев, для которых вид передаточных функций и их параметры отражают основные свойства рассматриваемых динамических процессов: инерционность, запаздывание, форсирование [1]. Передаточные функции выступают в качестве линейного оператора преобразования темпов расходования ресурсов в темпы выпуска продукции.

Математическая модель связи представляется одним из динамических звеньев (пропорциональным, инерционным, инерционным с запаздыванием, форсирующим), отражающих динамические свойства процесса обмена ресурсами между подсистемами комплекса.

нами графа изображают связи между подсистемами.

На рис. 1 представлена структура производственного комплекса, состоящего из четырех взаимосвязанных подсистем. Она построена с учетом взаимодействия подсистем с внешней средой, в качестве которой могут рассматриваться другие комплексы или отдельные предприятия, а также рынок готовой продукции. Взаимодействие подсистемы с внешней средой состоит в том, что часть ее готовой продукции реализуется вне комплекса, а на средства, полученные от реализации, приобретаются дополнительные ресурсы  $\dot{R}_i^*$ .

В качестве моделей связей между подсистемами и с внешней средой выбрана пропорциональная связь, где коэффициенты  $\alpha_{0i}$  определяют долю темпа выпуска продукции  $\dot{N}_i$ , направленную на реализацию во внешнюю среду:  $0 < \alpha_{0i} < 1$ , коэффициенты  $\alpha_{i0}$  — долю темпа дополнительных ресурсов  $\dot{R}_i^*$ , приобретенных на средства от реализации продукции и вложенных в производство  $i$ -й продукции:  $0 < \alpha_{i0} < 1$ , а коэффициенты связи  $\alpha_{ij}$ ,  $0 < \alpha_{ij} < 1$ , отражают производственно-экономические отношения между  $i$ -й и  $j$ -й подсистемами, показывая, какую долю в темпе расхода ресурса  $\dot{R}_i^0$  составляет темп выпуска продукции  $\dot{N}_j$ .

В качестве индивидуальной характеристики отдельной подсистемы рассматривается ее передаточная функция  $\Phi(s)$  в режиме управления, когда подсистема функционирует в изолированном от других подсистем состоянии, либо амплитудно-фазовая характеристика (АФХ)  $\Phi(j\omega)$ . Характеристика элемента многомерной связи отражает существующие взаимоотношения между подсистемами и строится из динамических звеньев, выражающих эти соотношения.

Для гомогенных систем, у которых индивидуальные характеристики подсистем  $\Phi_i(s)$  равны, введено понятие интегральной (обобщенной) характеристики связи.

Решаются две задачи: оценка устойчивости динамически равновесного состояния комплекса (равновесная задача), оценка устойчивости динамически неравновесного состояния (динамическая задача).

Для организационных систем состояние равновесия — это установившееся состояние, которое рассматривается в качестве невозмущенного движения. Примером установившихся состояний для производственных систем является выпуск продукции с постоянными темпами. Для производственных ком-

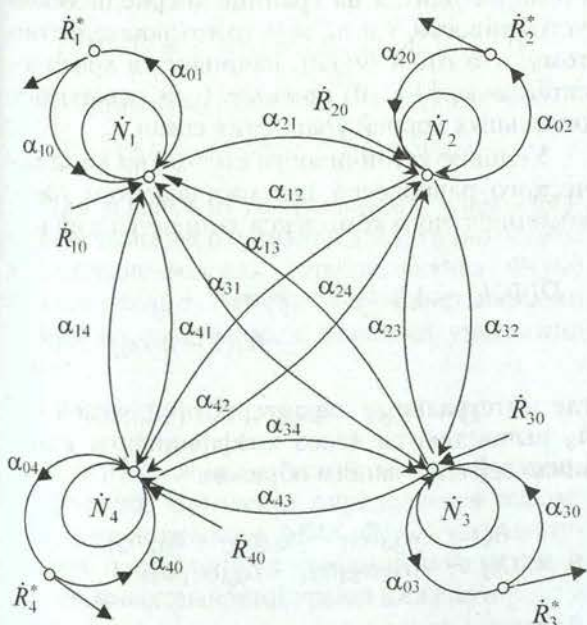


Рис. 1. Структурная схема ПК с учетом взаимодействия с внешней средой

Целесообразно разрабатывать математическое описание управляемого производственного комплекса в классе многосвязных систем, представленное в виде петлевого маркированного ориентированного графа. Подсистема представляется в форме петли при вершине графа, а связи между верши-

плексов им соответствует обмен ресурсами (продукцией) между подсистемами с постоянными темпами. В качестве возмущенного движения рассматривается как переход системы из одного равновесного состояния в другое равновесное состояние, так и отклонение от невозмущенного движения, вызванное действием внешних факторов. Возмущенное движение названо динамически неравновесным состоянием.

Решение равновесной задачи предполагает составление уравнений динамически равновесного состояния комплекса, которые получаются из уравнений движения при подстановке в них  $s = 0$ . Например, для  $n$ -компонентного производственного комплекса, подсистемы которого реализуют на рынке часть производимой продукции, уравнения движения запишутся в виде

$$\dot{N}_i(s) = \Phi_i(s) \left( \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \alpha_{ij} \dot{N}_j(s) + \dot{R}_{i0}(s) + \dot{R}_i^*(s) \right),$$

где  $i, j = \overline{1, n}$ .

Для такого комплекса в качестве модели подсистемы рассматривается модель с положительной обратной связью, в качестве модели связи — пропорциональное звено.

Математическая модель блока взаимодействия с внешней средой в случае, когда продукция подсистемы реализуется вне комплекса практически сразу, представлена безынерционным звеном с передаточной функцией вида  $W_p(s) = k_p$ , где  $k_p$  — коэффициент, отражающий связь между реализованной во внешней системе продукцией  $\dot{N}^*$  и дополнительными ресурсами  $\dot{R}^*$ , приобретенными на средства от ее реализации. Эта связь эффективна только в том случае, когда  $k_p > 1$ .

Связь подсистемы с внешней средой отражает модель связи, представленная динамическим звеном с передаточной функцией вида  $W_0(s) = \alpha_0$ .

При  $s = 0$  выражение для  $\Phi(s)$  принимает вид

$$\Phi(0) = \frac{k_n}{1 - k_n k_p \alpha_0},$$

где  $k_n$  — коэффициент, характеризующий динамичность производственной подсистемы и показывающий, во сколько раз возрастают темпы выпуска продукции при повышении темпов поступления ресурсов на 1%.

При  $k_n = 1$   $\Phi(0) = \frac{1}{1 - k_p \alpha_0}$ .

Рассматривая частный случай — трехкомпонентный комплекс, — предположим, что  $\Phi_1(0) = \Phi_2(0) = \Phi_3(0) = \Phi(0) = \frac{1}{1 - k_p \alpha_0}$ .

Тогда решение равновесной задачи сводится к решению уравнений динамического равновесия

$$\dot{N}_1 = \frac{1}{1 - k_p \alpha_0} (\alpha_{12} \dot{N}_2 + \alpha_{13} \dot{N}_3) + \dot{R}_{10};$$

$$\dot{N}_2 = \frac{1}{1 - k_p \alpha_0} (\alpha_{21} \dot{N}_1 + \alpha_{23} \dot{N}_3) + \dot{R}_{20};$$

$$\dot{N}_3 = \frac{1}{1 - k_p \alpha_0} (\alpha_{31} \dot{N}_1 + \alpha_{32} \dot{N}_2) + \dot{R}_{30}.$$

Если характеристическое уравнение представить в развернутом виде, то свободный член равен

$$a_n = 1 + h_2 + h_2 + \dots + h_n,$$

где  $h_i$  — интегральные характеристики связи.

Поэтому в дальнейшем говорится об устойчивости равновесного состояния, имея в виду выполнение условия положительности свободного члена характеристического уравнения, т. е.  $a_n > 0$ . При этом если система находится на границе апериодической устойчивости, т. е.  $a_n = 0$ , то это эквивалентно тому, что АФХ  $\Phi(j\omega)$ , начинаясь в критической точке  $(+1, j0)$  при  $\omega = 0$ , не охватывает остальных корней уравнения связи.

Условие устойчивости состояния динамического равновесия рассматриваемого трехкомпонентного комплекса запишется в виде

$$D(\Phi, h) = 1 + h_2(1 - k_p \alpha_0)^2 + h_3(1 - k_p \alpha_0)^3 > 0,$$

где интегральные характеристики связей  $h_2, h_3$  вычисляются через коэффициенты взаимосвязей следующим образом:

$$h_2 = -\alpha_{13}\alpha_{31} - \alpha_{23}\alpha_{32} - \alpha_{12}\alpha_{21};$$

$$h_3 = -\alpha_{12}\alpha_{23}\alpha_{31} - \alpha_{13}\alpha_{21}\alpha_{32}.$$

Для четырехкомпонентного комплекса запись уравнений динамического равновесия, а также определение условия устойчивости динамически равновесного состояния выполняются аналогично тому, как это делается для трехкомпонентного комплекса.

Анализ устойчивости динамически равновесного состояния комплекса для различных типов его структуры позволяет отметить, что область устойчивости функционирования

комплекса сужается с увеличением количества подсистем, с увеличением интенсивности производства подсистем, с увеличением интенсивности связей между подсистемами, для полносвязной структуры по сравнению с неполносвязной структурой, при реализации подсистемами части продукции во внешней среде.

Анализ результатов позволяет утверждать, что связь (производственные отношения) между парами подсистем играет большую роль в формировании устойчивости комплекса, чем отношения между тройкой подсистем, четверкой и т. д. Поэтому при оценке устойчивости динамически равновесного состояния многокомпонентных комплексов по предлагаемым моделям можно ограничиться рассмотрением производственных связей между парами подсистем независимо от количества взаимосвязанных подсистем.

Задача анализа устойчивости динамически неравновесного состояния комплекса решается на основе описания его как многосвязной гомогенной динамической системы на примере трехкомпонентного комплекса.

Характеристическая функция для трехкомпонентного комплекса записывается в виде

$$D(\Phi, H) = 1 + h_2\Phi^2(s) + h_3\Phi^3(s) = 0.$$

Подставив в уравнение  $s = j\omega$ , получим

$$D(j\omega) = 1 + h_2\Phi^2(j\omega) + h_3\Phi^3(j\omega) = 0.$$

Для устойчивости гомогенной многосвязной системы необходимо и достаточно, чтобы амплитудно-фазовая характеристика  $\Phi(j\omega)$  при изменении  $\omega$  от 0 до  $\infty$  не охватывала ни одного из собственных значений уравнения связи

$$D(h, x) = 1 + h_2x^2 + h_3x^3 = 0.$$

Другими словами, устойчивость функционирования комплекса определяется взаимным расположением АФХ  $\Phi(j\omega)$  индивидуальных передаточных функций подсистем и собственных значений уравнения связи.

Предложен алгоритм принятия решений по формированию производственных отношений (связей) в производственном комплексе, исходя из условия обеспечения устойчивости его динамически равновесного и неравновесного состояний. Использование полученных результатов позволит повысить эффективность управления производственными комплексами за счет использования динамических моделей при принятии решений.

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МНОГОПРОДУКТОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Исследуется деятельность предприятия, выпускающего продукцию различных видов одного функционального назначения. Потребляемые при этом ресурсы взаимозаменяемы. Предприятие продает готовые изделия потребителям в точках сбыта, которые образуют управляемую сеть реализации продукции одного товарного рынка. Такая система названа многопродуктовой многорыночной производственной системой, модель которой разрабатывается в форме кибернетической системы, отражающей согласованное изменение основных параметров производства и реализации в любой момент времени. Главной целью управления является формирование управленческих воздействий, направленных на изменение параметров, повышающее эффективность функционирования системы. Комплексное оценивание эффективности системы проводится путем анализа выручки и прибыли предприятия.

На основе предложенной методологии исследования и интеллектуального управления производством разработана общая функциональная схема модели многопродуктовой производственной системы, структурированная по видам продукции и по выполняемым функциям. Каждый  $l$ -й канал в модели отражает производство и реализацию  $l$ -го вида продукции. Каждая функциональная подмодель описывает основные действия и расчеты, выполняемые для всех видов продукции. Такая многоканальная система оказывается и многосвязной через рынок, если в соответствии с некоторым алгоритмом принятия решений каждый из  $n$  видов товара может продаваться не только на «собственном» рынке товара, но и на рынках, где этот товар является взаимозаменяемым.

Обобщенная модель производственной системы состоит из связанных между собой подмоделей: распределения обобщенного ресурса между видами выпускаемой продукции; производства продукции; формирования затрат на производство и сбыт; реализации продукции; расчета выручки и прибыли.

Динамические модели многопродуктовой производственной системы разработаны в классе нелинейных систем, описываемых дифференциальными уравнениями; они решаются численными методами с использованием имитационного моделирования.

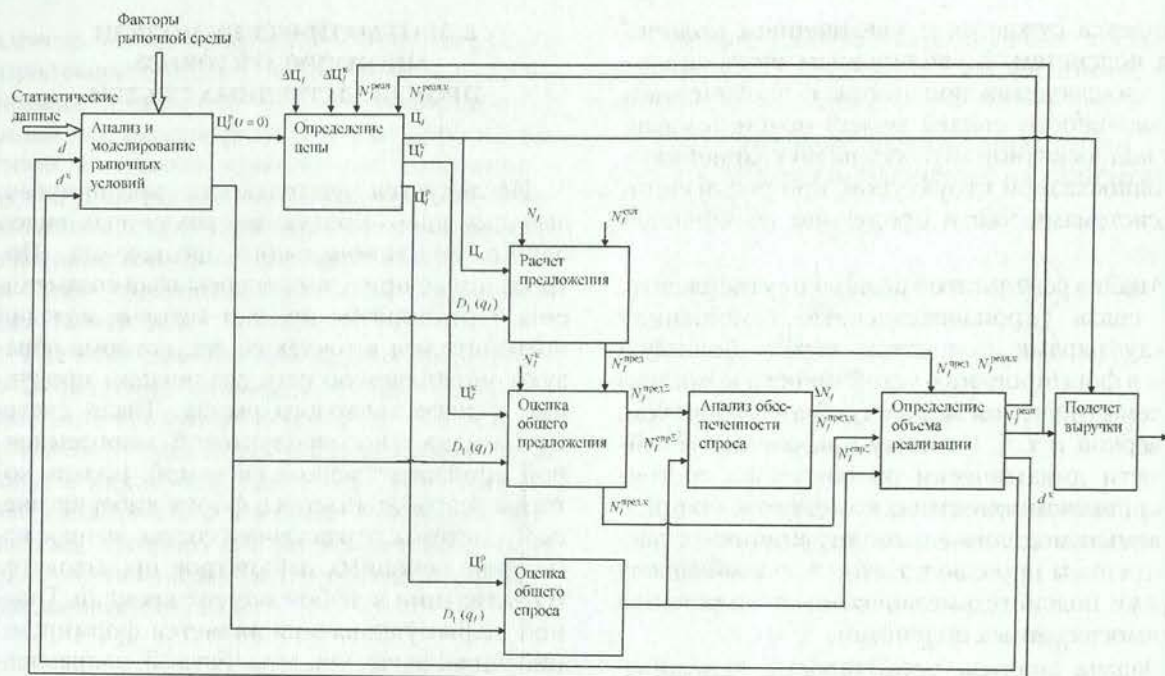


Рис. 2. Функциональная схема подмодели реализации продукции  $l$ -го вида

Модель производства продукции позволяет отразить динамику процессов выпуска продукции с целью принятия эффективных решений по управлению. Модель реализации продукции предназначена для описания происходящих на рынках сбыта динамических процессов изменения объемов реализации и формирования цен. При этом модель реализации продукции для рынка взаимозаменяемых товаров, сегментированного по общности интересов потребителей к товару каждого вида, должна быть дополнена моделью с территориальной сегментацией рынка товара. В общем случае следует рассматривать многопродуктовую производственно-сбытовую систему, структурированную по рынкам товаров (по числу видов выпускаемой продукции  $l = \overline{1, n}$ ) и по точкам сбыта (территориальным сегментам  $\lambda$ -го рынка,  $\lambda = \overline{1, \Lambda}$ ).

Поскольку производственная система рассматривается как многоканальный и многосвязный объект управления, функциональные связи в подсистеме реализации возникают:

- при определении объема предложения продукции  $l$ -го вида по точкам сбыта (территориальным рынкам);
- при перераспределении излишков предложения между территориально удаленными точками сбыта, что сопряжено с дополнительными затратами;
- при формировании перекрестных связей внутри территориального рынка по правилам

сегментации по общности интересов потребителей к одному товару.

Анализ рыночных условий при управлении реализацией продукции ведется с использованием паутинообразной модели рынка. Выделены факторы рыночной среды, вызывающие смещение функциональных зависимостей цены от спроса (кривой спроса) и цены от предложения (кривой предложения) относительно осей координат (неценовые детерминанты спроса и предложения), а также факторы, вызывающие изменение эластичности спроса [3].

Каждая отдельная подмодель реализации продукции  $l$ -го вида включает следующие действия (рис. 2):

- построение кривой спроса  $D_0^*(q_l)$  и кривой предложения  $S_0^*(q_l)$  по известным статистическим данным предприятия о реализации и выпуске продукции;
- построение на их основе с учетом доли  $d$  исследуемого предприятия на рынке сбыта кривых общего спроса  $D_0(q_l)$  и общего предложения  $S_0(q_l)$  продукции;
- определение равновесной рыночной цены  $\Pi_l^P(t=0)$  на начальный момент времени;
- расчет смещений кривых спроса  $D_0(q_l)$  и предложения  $S_0(q_l)$  под действием факторов рыночной среды, определение новых положений  $D_1(q_l)$  и  $S_1(q_l)$  этих кривых и новых значений равновесной цены  $\Pi_l^P$ ;

- определение предложения продукции  $N_i^{\text{пред}}$ , оцениваемого по кривой спроса  $D_1(q_i)$  для значения цены  $\Pi_i$  и рассчитываемого с учетом значений объема выпуска  $N_i$ , поставок продукции со склада  $N_i^{\text{скл}}$  и цены  $\Pi_i$ , формируемой путем индивидуальной надбавки предприятия  $\Delta\Pi_i$  к равновесной цене;

- оценку общего предложения продукции  $N_i^{\text{пред}\Sigma}$  с учетом предложения конкурента  $N_i^{\text{пред.к}}$ , оцениваемого по кривой спроса  $D_1(q_i)$  для значения цены конкурента  $\Pi_i^k$  и рассчитываемого с учетом значений объема его выпуска  $N_i^k$  и цены  $\Pi_i^k$ , формируемой путем индивидуальной надбавки  $\Delta\Pi_i^k$  к равновесной цене;

- оценку общего спроса на продукцию  $N_i^{\text{спр}\Sigma}$ , рассчитываемого по кривой спроса  $D_1(q_i)$  для значения равновесной цены  $\Pi_i^p$ ;

- определение разницы  $\Delta N_i$  между общим спросом  $N_i^{\text{спр}\Sigma}$  и общим предложением  $N_i^{\text{пред}\Sigma}$  продукции. Эта величина характеризует ситуацию на рынке (обеспеченность рынка) и качественно, и количественно;

- определение объема реализации продукции  $N_i^{\text{реал}}$  предприятия на «собственном» рынке с учетом разницы  $\Delta N_i$  и его доли  $d$  на рынке, а также оценку объема реализации продукции конкурента  $N_i^{\text{реал.к}}$ ;

- расчет доли предприятия  $d$  и доли его конкурента  $d^k$  на рынке;

- определение равновесной цены продукции на текущий момент времени  $\Pi_i^p$  на основе значений цены и объема реализации предприятия на предыдущий момент времени, а также аналогичных значений цены и объема реализации его конкурентов;

- определение цены продукции при продаже ее на «собственном»  $l$ -м рынке  $\Pi_i^p$  с учетом добавки  $\Delta\Pi_i$  к равновесной цене  $\Pi_i^p$ ;

- расчет выручки от реализации продукции.

#### 4. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

Выявленные особенности производственной системы как объекта управления, а также особенности управления в условиях неопределенности рыночной среды позволяют выбрать методы искусственного интеллекта на базе моделей нечеткой логики и нейронных сетей в качестве основных методов решения задач планирования, прогнозирования и поддержки принятия решений по управлению производством.

Приятие решений по управлению производственной системой состоит в обосновании новых значений вектора управляемых переменных по отношению к их значениям, сформировавшимся на предыдущем шаге управления. Управление сводится к преобразованию текущего состояния системы в целевое:

$$S_i\{\bar{P}\} \Rightarrow S_{i+1}\{\bar{P}^*\}.$$

Идентификация состояния производственной системы выполняется с помощью вектора управляемых переменных  $\bar{P} = \{\Pi, \dot{\Pi}, \Delta\Pi, \varepsilon, \dot{\varepsilon}\}$ , отражающего динамику системы показателями объема  $\Pi$  и темпа прибыли  $\dot{\Pi}$ , отклонения  $\Delta\Pi$  фактической прибыли от плановой, отклонения  $\varepsilon$  спроса от предложения, а также темпа  $\dot{\varepsilon}$  его изменения.

В качестве управляющих переменных выбраны объем выпуска продукции  $N$ , темп выпуска  $\dot{N}$ , цена  $\Pi$ , затраты на рекламу  $\dot{Z}_{\text{рекл}}$ , затраты по организации продаж  $\dot{Z}_{\text{прод}}$ , затраты на транспортировку продукции  $\dot{Z}_{\text{тран}}$ , темп формирования страховых запасов (накопления и расходования)  $\dot{N}_{\text{скл}}$ , объединенные в вектор решений  $\bar{R} = \{N, \dot{N}, \Pi, \dot{Z}_{\text{рекл}}, \dot{Z}_{\text{прод}}, \dot{Z}_{\text{тран}}, \dot{N}_{\text{скл}}\}$ .

Для решения задач управления предложен подход, который состоит в реализации процедур ситуационного управления на основе нейросетевых и нейро-нечетких моделей [1, 4].

- этап 1 — идентификация ситуации: определение векторов  $\bar{P}$  и  $\bar{R}$ ; определение функций принадлежности значений лингвистических переменных векторов  $\bar{P}$  и  $\bar{R}$ ;

- этап 2 — классификация ситуаций на основе нейросетевой модели;

- этап 3 — выбор наиболее эффективно решения из множества рекомендуемых на основе нейро-нечеткой модели: формирование базы правил принятия решений на основе совокупности нейронных сетей; выбор механизма (алгоритма) логического вывода и метода дефаззификации; формирование множества управляющих решений и выбор наиболее эффективного из них на основе нечеткой модели.

Предложенный подход к управлению позволяет в автоматизированном режиме решать задачи идентификации, классификации ситуаций и выбора решений формализованными процедурами, учитывающими неопределенность при анализе ситуации и экспертную субъективность выбора решений человеком при управлении производственно-сбытовой деятельностью предприятия.



Разработка нейросетевых моделей классификации ситуаций, формирования базы правил принятия решений, планирования и прогнозирования основана на обобщенной модели построения нейронной сети, в которой формируются множества входов In с указанием их количества  $K_{in}$  и идентификаторов  $Name_{in}$ ; множества выходов Out с указанием их количества  $K_{out}$  и идентификаторов  $Name_{out}$ ; множества слоев Layer с указанием их количества  $K_c$  и количества нейронов в скрытом слое  $K_{neur}$ :

$$M_{nc} = \left\{ \text{In}\{K_{in}, \text{Name}_{in}\}, \text{Layer}\{K_c, K_{neur}\}, \right. \\ \left. \text{Out}\{K_{out}, \text{Name}_{out}\} \right\}.$$

Нейросетевая модель планирования объема выпуска продукции от потребности состоит из двух взаимосвязанных (In – Out) подмоделей:

- подмодели планирования потребности в ресурсах

$$M_{nc1} = \left\{ \text{In}\{n, \text{Name}_n\}, \text{Layer}\{2, K_{neur}\}, \right. \\ \left. \text{Out}\{m, (c_1, c_2, \dots, c_m)\} \right\};$$

- подмодели планирования объема выпуска  $n$  наименований продукции с учетом номенклатуры  $\text{Name}_n$

$$M_{nc2} = \left\{ \text{In}\{m, (c_1, c_2, \dots, c_m)\}, \right. \\ \left. \text{Layer}\{2, K_{neur}\}, \text{Out}\{n, \text{Name}_n\} \right\}.$$

Выходные переменные модели  $M_{nc1}$  являются входными в модели  $M_{nc2}$ .

Разработанный метод решения задачи планирования выпуска продукции от потребности позволяет с использованием плохо определенных данных строить системы планирования, быстро реагирующие на изменяющуюся ситуацию в производстве и на рынке, учитывающие ограничения по ресурсам и технологическим возможностям предприятия.

Разработана технология формирования решений по управлению производством, которая строится по модельно-функциональному принципу, когда последовательность анализа данных соответствует функциям управления производственной системой, а способы обработки данных — интеллектуальным (нейро-нечетким) моделям.

Идентификация состояния производственной системы заключается в определении значений вектора управляемых переменных, представимого в виде как числовых, так и лингвистических значений переменных. Для каждой составляющей вектора состояния определяются возможные значения лингвистических переменных и строятся функции принадлежности.

Модель классификации ситуаций разработана на основе обобщенной сетевой модели как двухслойная нейронная сеть:

$$M_{nc3} = \left\{ \text{In}\{5, (\Pi, \dot{\Pi}, \Delta\Pi, \varepsilon, \dot{\varepsilon})\}, \text{Layer}\{2, 15\}, \right. \\ \left. \text{Out}\{7, (S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}, S_V, S_{VI}, S_{VII})\} \right\}.$$

Генерирование возможных решений осуществляется с помощью совокупности двухслойных нейронных сетей, количество и взаимосвязь между которыми определяются числом переменных вектора решений. На входы нейронных сетей подаются значения переменных вектора состояния производственной системы, на выходе формируются значения переменных вектора решений:

$$M_{nc4j} = \left\{ \text{In}\{5, (\Pi, \dot{\Pi}, \Delta\Pi, \varepsilon, \dot{\varepsilon})\}, \text{Layer}\{2, 13\}, \right. \\ \left. \text{Out}\{5, (\text{уменьшить, немного уменьшить, оставить на прежнем уровне, немного увеличить, увеличить})\} \right\}.$$

Нейронная сеть используется для построения недостающих конструкций в базе правил. Полученные с помощью нейронной сети правила, возможные в данной ситуации, поступают в нечеткую модель поддержки решений:

$$M_{nлj} = \left\{ \mu(\Pi), \mu(\dot{\Pi}), \mu(\Delta\Pi), \right. \\ \left. \mu(\varepsilon), \mu(\dot{\varepsilon}), \mu(R_j), \alpha_m, \{R_j\} \right\},$$

где  $\mu(\Pi)$ ,  $\mu(\dot{\Pi})$ ,  $\mu(\Delta\Pi)$ ,  $\mu(\varepsilon)$ ,  $\mu(\dot{\varepsilon})$  — степени принадлежности фактических значений лингвистических переменных  $\Pi$ ,  $\dot{\Pi}$ ,  $\Delta\Pi$ ,  $\varepsilon$ ,  $\dot{\varepsilon}$  нечетким подмножествам, определенным в условной части  $m$ -го правила;  $\mu(R_j)$  — степень принадлежности фактического значения лингвистической переменной вектора решений  $\bar{R}$ ;  $\alpha_m = \min\{\mu(\Pi), \mu(\dot{\Pi}), \mu(\Delta\Pi), \mu(\varepsilon), \mu(\dot{\varepsilon})\}$  — уровни активности правил принятия решений.

Полученные значения каждой переменной вектора решений являются наиболее эффективными решениями в конкретной ситуации.

Они предлагаются человеку для анализа и выбора окончательного решения по изменению ситуации в производстве и на рынке.

Разработанная нейро-нечеткая модель поддержки решений отличается от известных тем, что в ней учитывается неопределенность при оценке состояния производства и рынка, при анализе и развитии ситуаций, при определении новых значений управляющих переменных, при выборе альтернативных способов исполнения решений.

Нейросетевые модели прогнозирования строятся на основе обобщенной модели  $M_{НС}$  для различных показателей внешней среды и производственно-сбытовой деятельности системы: спроса, предложения конкурентов, цены, реализации продукции. Например, модель прогнозирования спроса имеет вид

$$M_{НС5} = \left\{ \text{In}\{2, (\text{Цена}, \text{Предложение})\}, \right. \\ \left. \text{Layer}\{2, 11\}, \text{Out}\{1, (\text{Спрос})\} \right\}.$$

Предложенные модели прогнозирования отличаются от известных тем, что учитывают не только ретроспективные значения прогнозируемых показателей, но и парируют неопределенность внешней среды, объекта управления и системы управления. Они эффективны в условиях неполных и неточных данных и позволяют выявить факторы, наиболее сильно влияющие на процессы производства и сбыта продукции.

## 5. СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПК И ПС

Разработаны структура, функциональная схема и программное обеспечение автоматизированной системы имитационного моделирования динамики функционирования производственных комплексов, базирующейся на предложенной методологии моделирования управляемых ПК. Программное обеспечение соответствует динамическим моделям ПК и их элементов, позволяет исследовать динамику функционирования комплекса и оценивать устойчивость его динамически равновесных и неравновесных состояний, пригодно для обучения пользователей управлению организацией взаимодействия подсистем в составе комплекса.

Исследования динамики функционирования производственных комплексов проводились с использованием разработанной АСИМ по трем направлениям:

- исследования устойчивости функционирования ПК при изменении связей между подсистемами;

- исследования устойчивости функционирования ПК с различными динамическими характеристиками подсистем;

- исследования устойчивости функционирования ПК при действии возмущений.

На примере трех- и четырехкомпонентного комплексов установлено, что усиление связей, или увеличение интенсивности материальных потоков между подсистемами, позволяет увеличить интенсивность производства всех подсистем, но снижает запас устойчивости функционирования комплекса в целом. С увеличением количества связей, претерпевающих изменения, эти тенденции усиливаются. Вместе с тем одновременное усиление всех связей в комплексе приводит к неритмичности выпуска его подсистем.

Исследования влияния организационного управления подсистемами на устойчивость функционирования комплекса выполнены на примере трехкомпонентного комплекса. Результаты экспериментов позволяют утверждать, что при хорошо организованной работе подсистем можно только увеличить интенсивность их взаимодействия либо уменьшить статическую устойчивость, но нельзя сделать систему колебательно неустойчивой, т. е. нельзя нарушить устойчивость динамически неравновесного состояния.

Проведены исследования функционирования трехкомпонентного комплекса при действии возмущений, приводящих к нарушению производственных связей между подсистемами. Установлено, что нарушение хотя бы одной связи вызывает снижение темпов выпуска продукции всеми подсистемами комплекса, нарушение сильной связи влияет в большей мере, чем нарушение слабой связи. Нарушение нескольких связей приводит к более сильному снижению темпов, чем нарушение одной связи. Например, следствием нарушения одной связи (например, снижения интенсивности материального потока из первой подсистемы во вторую) является снижение интенсивности производства всех подсистем комплекса — на 2,6%, 13,9% и 4,7% соответственно, а одновременного нарушения двух связей — на 15,1%, 24,9% и 9,3%.

Достижение начальных темпов производства подсистемами обеспечивается либо при увеличении расхода собственных ресурсов подсистемами путем привлечения дополни-

тельных ресурсов из внешних систем, либо при восстановлении нарушений связи.

Разработаны структура, функциональная схема и программное обеспечение АСИМ динамики функционирования и поддержки принятия решений по управлению производством [5, 6]. Она базируется на теоретически обоснованных подходах к моделированию и управлению ПС, реализована в концепции развитой моделирующей среды, имеет дружественный интерфейс, обеспечивающий возможность интерактивного построения моделей производственных систем произвольного уровня сложности, исследования динамики процессов производства и сбыта продукции, а также поддержку решений по управлению производством в условиях рыночной среды, пригодна для обучения пользователей методам управления ПС в условиях рынка.

#### ВЫВОДЫ

На основе АСИМ разработаны и внедрены:

- методика проектирования системы управления, реализующая предложенные структуры, модели и алгоритмы управления производством в условиях неопределенности рыночной среды;

- методика системных исследований процессов производства и сбыта продукции в условиях рынка, позволяющая проводить эксперименты над моделями ПС по исследованию управляемости системы, выполнять анализ эффективности алгоритмов управления и осуществлять выбор целесообразной тактики поведения ПС в условиях изменяющейся внешней среды;

- методика обучения, позволяющая исследовать поведение как реальных производственных систем, так и проектируемых в процессе обучения.

Проведенные исследования эффективности предложенных интеллектуальных алгоритмов управления производством подтверждают повышение прибыли на 5–10% от про-

изводственно-сбытовой деятельности предприятия машиностроения по выпуску товаров народного потребления за счет принятия решений по корректировке темпов и объемов выпуска продукции в соответствии с рыночной потребностью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Интеллектуальное** управление производственными системами / С. Т. Кусимов, Б. Г. Ильясов, Л. А. Исмагилова, Р. Г. Валеева. М.: Машиностроение, 2001. 327 с.
2. **Валеева Р. Г.** Имитационное моделирование и интеллектуальное управление мультиагентной производственной системой // Вестник УГАТУ. 2000. № 2. С. 211–214.
3. **Валеева Р. Г., Сильнова С. В.** Анализ и моделирование рыночных условий при управлении предприятием // Автоматизация и современные технологии. 2003. № 2. С. 15–21.
4. **Ильясов Б. Г., Исмагилова Л. А., Валеева Р. Г., Сергеева И. Г.** Применение нейронечетких моделей в управлении производством // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2001. № 4–5. С. 36–43.
5. **Валеева Р. Г., Петренко А. Л.** Программный комплекс для моделирования и исследования производственных систем // Информационные технологии. 2002. № 11. С. 58–64.
6. **Свид.** об офиц. рег. прогн. для ЭВМ № 2002611510. Система имитационного моделирования динамики и принятия решений по управлению производством / Р. Г. Валеева, А. Л. Петренко. М.: РосПатент, 2002.

#### ОБ АВТОРЕ



**Валеева Роза Гумеровна**, доц. каф. техн. кибернетики. Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1974). Д-р техн. наук по управлению в социальных и экономических системах (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. моделирования и управления производств. системами.